

# 実橋梁の長期モニタリングにおける支承変位の変動に関する基礎的検討

Bearing displacement variation in long term monitoring of a steel bridge

- |              |      |                          |
|--------------|------|--------------------------|
| 北見工業大学       | ○学生員 | 齊藤茉奈美 (Manami Saitoh)    |
| 北見工業大学       | 正会員  | 宮森保紀 (Yasunori Miyamori) |
| 北見工業大学大学院    | 学生員  | 吉中正滋 (Masaji Yoshinaka)  |
| 北見工業大学大学院    | 学生員  | 柴田祐貴 (Yuki Shibata)      |
| 日本航空電子工業 (株) |      | 大胡拓矢 (Takuya Daigo)      |
| 日本航空電子工業 (株) | 正会員  | 富岡昭浩 (Akihiro Tomioka)   |
| 長岡技術科学大学     | 正会員  | 宮下 剛 (Takeshi Miyashita) |

## 1. はじめに

今日、既存橋梁の老朽化が進み、橋梁の健全性を長期的に監視する構造ヘルスマニタリングへの関心が高まっている。構造ヘルスマニタリングでは測定データの変化から損傷や健全状態を評価することを目的とするが、実橋梁では損傷以外の要因でも構造物の状態が変化する。例えば著者らは、北見市内の橋梁において加速度、支点変位、温度の長期モニタリングを行っており、温度変化により橋梁の卓越振動数が変動することを明らかにしたり、温度変化が橋梁の応答に与える影響のメカニズムについては、例えば小林ら<sup>2)</sup>は、鋼コンクリート合成桁で外的な温度変化により桁断面内に温度勾配が生じ、内部拘束応力による変形が生じることを実験的に明らかにしている。実橋梁では、より複雑な影響を受けながら計測条件に制約があるため、今後さらなる事例の蓄積や研究の進展が望まれる。

橋梁の支承は、上部構造から伝達される荷重を下部構造に伝達し、活荷重や温度変化等による上部構造の伸縮や回転に追従し上・下部構造の相対的な変位を吸収するという重要な機能を有する。よって、上部構造と構造的に密接な関係にある支承の健全状態での定期的な変化を把握しておくことは、構造ヘルスマニタリングにおける損傷検知でも重要と考えられる。そこで本研究では、支承の鉛直および水平方向変位を長期計測し、気温、部材温度、日射が与える影響を検討したので、その結果を報告する。

## 2. 対象橋梁とモニタリング内容

対象橋梁の外観を図-1に示す。対象橋梁は北見市内に位置し、2007年に架設された橋長212mの4径間連続鋼合成少数主桁橋である。第1径間から第3径間は3主桁、第4径間(支間長35m)は2主桁(G1, G3)となっている。また、床版は合成床版で、支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承である。本研究では第4径間を対象としている。

本研究における計測機器はレーザー変位計4基(鉛直: オプテックスエフエー CD22-15-485M12, 橋軸: 同 CD22-100-485M122), 温度計9基(ティアンドデイ RTR-502)を図-2のように設置している。変位計はA2橋台上のG1, G3主桁を支持する支承の鉛直方向と橋軸方向に、図-3のように設置している。支承は鉛プラグ入り積層ゴム支承で、寸法は平面寸法720mm×720mm, 高さ265mmである。積層構成は、鋼板が6枚, ゴム層が7枚である。温度計は主



図-1 対象橋梁

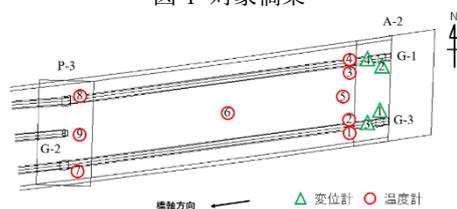


図-2 計測機器の配置

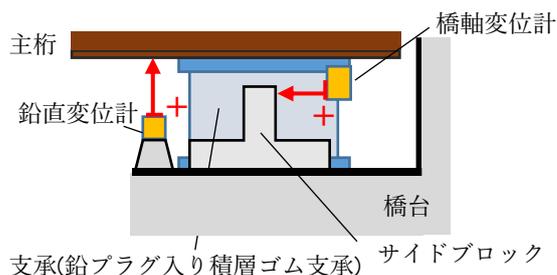


図-3 変位計の設置状況

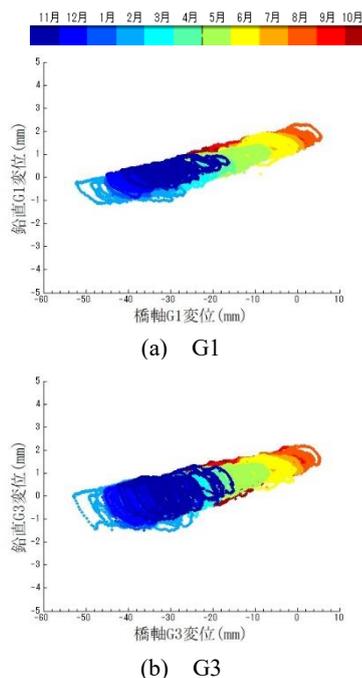


図-4 2次元支承変位

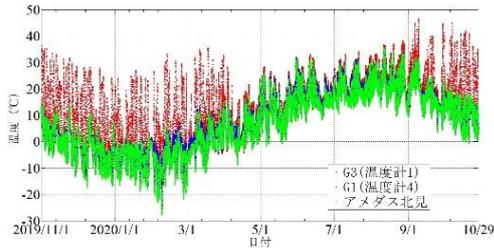


図-5 部材温度と気温の時刻歴

桁ウェブ 6 箇所，合成床版の下鋼板 3 箇所に設置している。また，気温は対象橋梁から北西に 2.7km のアメダス北見観測所の記録を用いた<sup>3)</sup>。温度の計測開始は 2018 年 5 月 16 日，変位の計測開始日は，橋軸方向が 2016 年 8 月 4 日，鉛直方向が 2019 年 10 月 31 日である。本研究は，橋軸・鉛直方向変位ともに 2019 年 10 月 31 日から 2020 年 10 月 29 日までの 1 年間を対象とする。測定間隔は，温度は 10 分間隔，変位については，サンプリング周波数は約 63Hz だが，MATLAB の resample コマンドを用いて 20Hz でリサンプリング処理を行った。なお本研究では，温度との相関を検討するため，変位についても 10 分間隔の記録を用いている。

### 3. 支承変位の季節変動

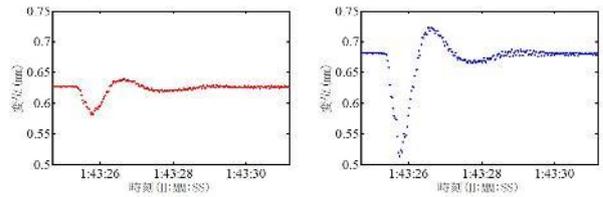
#### 3.1 橋軸変位と鉛直変位

図-4 は，横軸を橋軸変位，縦軸を鉛直変位とした 2 次元支承変位の散布図である。プロットの色は測定した月を表しており，2019 年 10 月 31 日から 2020 年 10 月 29 日まで青から赤に変化する。また，図-5 に主桁温度と気温の時刻歴，図-6 に動的変位の計測例として，車両 1 台が通過した際の各変位計の時刻歴変位を示す。

図-4 より，橋軸変位は年間で約 60mm，鉛直変位は約 4mm 変化する。橋軸，鉛直ともに最大値は 8 月，最小値は 2 月に記録しており，これは図-5 の最高気温と最低気温に対応しており，気温の季節変化が桁の伸び縮みに影響を及ぼしている。図-4 では橋軸方向だけでなく鉛直方向にも変位が変動している。変動幅は図-6 の動的変位の振幅より 10 倍以上大きく活荷重以外の要因が大きいと考えられる。また，G1 より G3 が，夏季より冬季の方が，変動幅が大きい。さらに，2 次元変位は散布図の面内で円を描くように変動しているが，この詳細は 3.3 節以降で述べる。

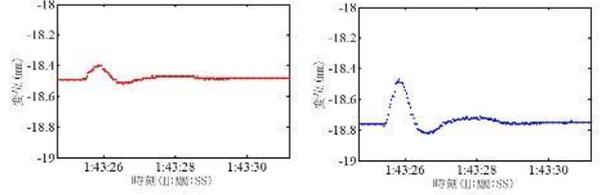
#### 3.2 気温と支承変位の相関関係

図-7 に気温と橋軸変位の散布図と相関係数，同様に図-8 に気温と鉛直変位を示す。気温と橋軸変位の相関係数は，どちらも高い正の相関があることがわかり，気温が橋軸変位に影響を及ぼしていることが確認できる。鉛直変位は G1，G3 いずれも正の相関があるが G3 が G1 よりも低いため，外気温以外の要素が鉛直変位に影響を与えたと考えられる。具体的には，南側の G3 には日射があり，G1 には日射がなく，図-5 では日射のある G3 の部材温度が G1 の温度や気温よりも高いことが関係していると考えられる。



(a) G1 鉛直

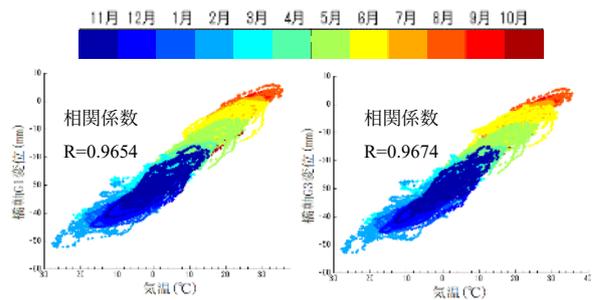
(b) G3 鉛直



(c) G1 橋軸

(d) G3 橋軸

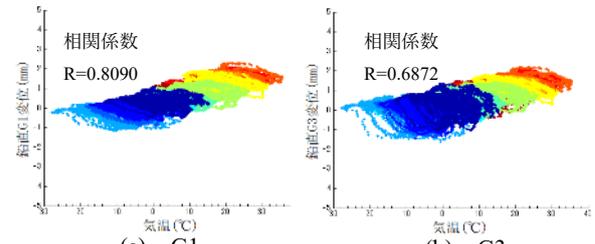
図-6 車両通過による変位の時刻歴



(a) G1

(b) G3

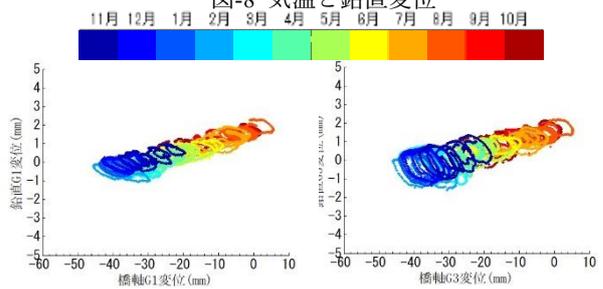
図-7 気温と橋軸変位



(a) G1

(b) G3

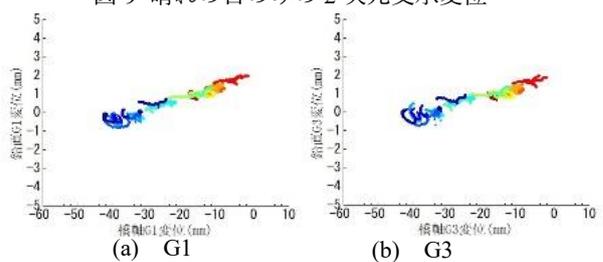
図-8 気温と鉛直変位



(a) G1

(b) G3

図-9 晴れの日みの 2 次元支承変位



(a) G1

(b) G3

図-10 曇りの日みの 2 次元支承変位

### 3.3 天候別の支承変位

日射の影響を検討するため、アメダス北見観測所の記録に基づき、天候ごとに支承変位を整理した。天候の選定基準は、まず、1時間降水量が1日を通して0mmで、日照時間がおおむね日中の90%以上の日を晴れとした。次に、1時間降水量の最大が0.5mm以下で、日照時間が1日を通して0hの日を曇りの日とした。これにより、晴れの日が68日間、曇りの日は32日間選定された。図-9に晴れの日、図-10に曇りの日の2次元支承変位を示す。

晴れの日には鉛直、橋軸ともに変位の変動が大きくなっており、図-4でも見受けられたようにG3の変動がより大きいことがわかる。一方で、曇りの日は鉛直、橋軸ともに変位の変動は小さく、鉛直に関してはほとんど変化しない日もある。また、G1とG3の違いもほとんどない。さらに月別の変動に着目すると、図-8(b)では、11月～3月、9月～10月の7か月間は4月～8月に比べ変動が大きい。

## 4. 支承変位の日変動

### 4.1 日射と変位の関係

図-11と図-12は、2019年11月25日と26日における、10分間ごとの日照時間と、G3に設置した温度計1の温度である。また図-13は、この2日間のG3側支承の2次元変位である。赤色が曇りの11月25日、青色が晴れの26日に対応している。

図-11の11月25日の温度変化は12時ごろにわずかに上昇するものの、その後は単調に低下している。図-13では、曇りの11月25日はほぼ直線的に-25mmから-33mmまで橋軸方向に変化しているが、12時ごろにわずかに鉛直方向に沈下している。一方、晴れの11月26日は、桁に日射が当たり始め気温が上昇する7時ごろから、鉛直方向に沈下、橋軸方向に伸張し、12時ごろに極値になる。そして、24時までにかけて元に戻る。12時に鉛直変位が最小になるのは、鉛直変位計を支間側に設置しているため、桁のたわみが発生していると推測する。このように11月26日の2次元変位は左回りで動いている。この1日の変動は、日射がある日に共通してみられる特徴である。また、日射がある日のG3の温度についても、図-12のように12時を最高とする変化が共通しているため、支承の挙動には、日射による桁の部材温度の変化が直接的に関係していると考えられる。また、2次元変位が左回りの軌跡を描くのは、水平方向変位は気温の影響が大きく、緩やかに変化するのに対して、鉛直方向の変位は桁温度の影響が大きく、桁温度が急速に変化する朝夕で変位も変化が大きく、正午前後と夜間は変化が小さいためと考えられる。

なお、日射の影響を直接受けないG1側の支承でも、G3側よりも変動幅は小さいものの同様の傾向が測定されている。これについてはG3側の温度がG1側まで伝達したこと、橋面上が日射を受け、床版を介してG1に熱エネルギーが伝達したことが考えられるが、詳細は床版内部の温度計測や熱伝導解析によって検討する必要がある。

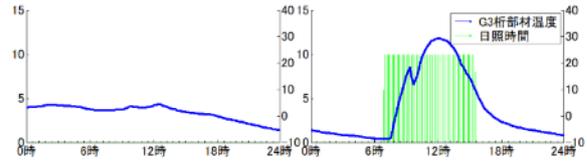


図-11 2019/11/25 部材温度 図-12 2019/11/26 部材温度

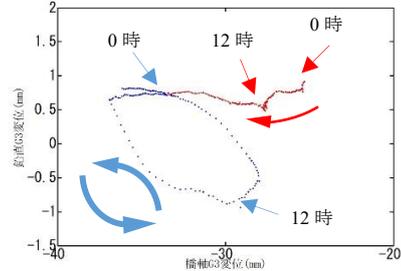


図-13 2019/11/26 部材温度

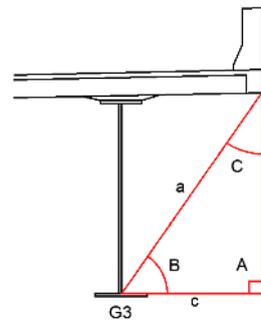


図-14 G3桁と太陽高度B

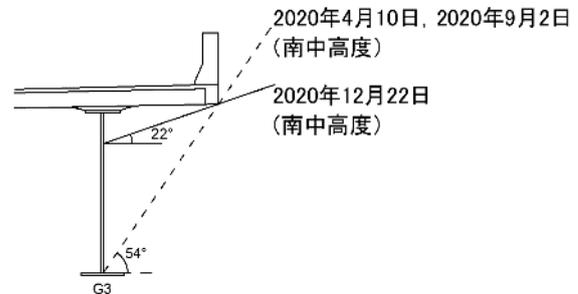


図-15 G3桁と各月の南中高度

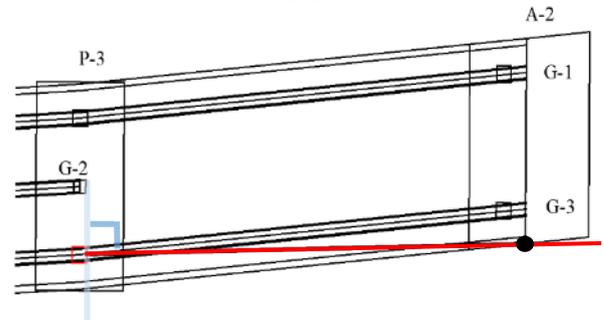


図-16 第4径間平面図

### 4.2 G3桁への日射角度、方位

前節では日射の影響により支承の橋軸-鉛直2次元変位が円を描くように変動することについて検討したが、この

表-1 桁への日照時間

計算日	日の出時刻と方位	Z>90°の時刻	B>54°の時刻と方位	B<54°の時刻と方位	Z>265°の時刻	日の入り時刻と方位	桁への日照時間
19/11/1	6:00 (109°08'22")					16:10(249°41'11")	10h10m
19/12/1	6:50 (122°02'31")					15:40(238°31'02")	8h30m
20/1/1	7:10 (123°55'11")					15:50(236°54'36")	8h40m
20/2/1	6:50 (114°47'40")					16:20(244°14'33")	9h10m
20/3/1	6:10 (101°09'09")					17:10(260°03'39")	11h20m
20/4/1	5:20 (85°13'46")	5:50			16:40	17:40(275°28'01")	10h40m
20/5/1	4:30 (70°16'32")	6:30	9:40 (134°59'53")	13:00 (223°52'49")	15:50	18:20(291°00'03")	6h00m
20/6/1	4:00 (60°12'41")	7:10	9:10 (117°40'45")	13:40 (243°50'59")	15:20	18:50(300°44'02")	3h40m
20/7/1	4:00 (58°28'49")	7:20	9:10 (114°43'31")	13:50 (246°07'28")	15:20	19:00(302°01'31")	3h20m
20/8/1	4:20 (64°56'59")	7:00	9:40 (129°08'08")	13:30 (233°32'00")	15:50	18:40(294°38'38")	5h00m
20/9/1	5:00 (79°48'27")	6:00	11:10 (173°50'44")	11:40 (186°34'03")	16:30	17:50(280°13'07")	10h00m
20/10/1	5:30 (95°03'13")					17:00(265°06'10")	11h30m

B: 太陽高度, Z: 太陽の方位角

変動幅は4~8月の方が小さい。一般には日照時間の長い夏季の方が部材の温度上昇が大きくなり、変位の変動幅も大きくなると考えられるが、橋梁は床版の片持ち部や橋台のバラベットやウイングがあるため、太陽の高度や方位によっては主桁(ウェブ)に日射が当たらない場合がある。そこで、G3における日射の関係を検討した。

図-14にG3と太陽高度の関係図を示す。G3に日が当たる角度は式(1)から求める。三角形の各辺の長さは図面に基づき、 $a=3772\text{mm}$ ,  $b=3050\text{mm}$ ,  $c=2220\text{mm}$ とした。 $\angle A = 90^\circ$ より、

$$\angle B = \sin^{-1}\left(\frac{b}{a}\right) = \sin^{-1}\left(\frac{3050}{3772}\right) = 53.96^\circ \quad (1)$$

つまり、角度B(太陽高度)が54°未満の時にG3に日射が当たり、部材温度が上昇する。図-15にG3のウェブに日射が当たり始める9月と、当たらなくなる4月の太陽高度と、ウェブの最も高いところまで日射が当たる12月の太陽高度を示す。この太陽高度Bは、国立天文台のWeb版太陽高度計算式<sup>4)</sup>に対象橋梁の緯度、経度、標高を入力し算出した値である。太陽高度Bが最も低くなる12月でも桁全体ではなく、桁の下側のみが日射を受ける。このように、夏は日照時間が長い、昼間は太陽高度Bが54°よりも高くなるため、G3への直射日光は朝夕のみである。一方で冬は昼間でも常に桁に日が当たる。

さらに太陽の方位角についても検討する。図-16は第4径間の平面図である。P3橋脚上のG3の桁端とA2橋台のウイングを結んだ線の方位角は90°(真東)になる。つまり、太陽の方位角Zが90°より大きくなると第4径間に日が当たり始める。また、図-17はA2橋台G3側の平面図で、G3の桁端とウイングの端部を結んだ線の方位角は165°である。この時に第4径間全体に日が当たり始める。さらに桁端からG3のウェブの方位角は265°である。この角度を超えると第4径間には日が当たらなくなる。つまり、太陽の方位角が90°の時に第4径間に日が当たり始め、165°の時に径間全体に日が当たり、265°の時に日が当たらなくなる。このように、太陽高度Bと太陽の方位角Zの両方が条件を満たしたときにG3に日が当たる。G3への日照時間を、各月の1日について表-1にまとめた。表-1から5~9月では南中前後は桁に日が当たらない時間があり、G3への日照時間はより短くなる。

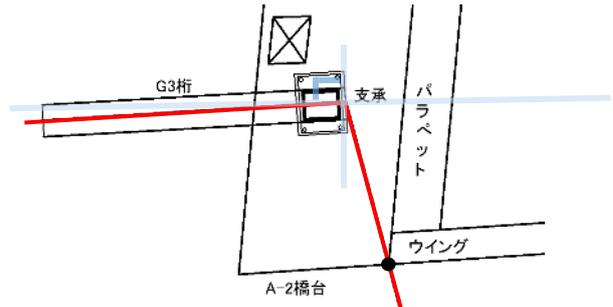


図-17 A2橋台G3桁側平面図

以上から、G3支承の変位は、気温の季節変動による橋軸方向の伸縮と、桁への日射による部材温度の変化により鉛直方向の支承変位が発生することが分かった。

## 5. まとめ

本研究では、北見市内の橋梁において、2019年11月から2020年10月に記録した支承の橋軸、鉛直変位の計測結果から、支承変位の年変動、日変動を確認した。また、気温や日射などの環境要因と支承変位の関係を整理した。年変動において、橋軸方向変位は気温の影響が大きく、また、鉛直変位においても気温との相関があったが、桁への日射も大きな影響を及ぼしていることを確認した。鉛直変位が生じる原因は、桁の下部に日射があたること、桁にたわみが発生していると推測される。この鉛直変位は、桁に日射があるときに発生するため、正午前後にG3への日射がない5~9月は鉛直変位の変動幅が小さくなることが分かった。この桁のたわみについては、支承の支間側のみならず桁端側の鉛直変位も計測し、より詳細な検討を行う必要があると考えられる。

## 謝辞

計測に際しては、国土交通省北海道開発網走建設部北見道路事務所にご協力いただきました。ここに記して感謝いたします。

## 参考文献

- 1) 吉中正滋, 宮森保紀, 大胡拓矢, 富岡昭浩, 宮下剛: 長期モニタリングによる鋼桁橋の部材温度が動的特性に与える影響, 令和1年度土木学会北海道支部論文報告集, 第76号, A-13, 2020.
- 2) 小林裕介, 三木千壽, 出野麻由子, 斎藤勝晶: 合成桁橋梁の健全度モニタリングを目的とした温度変形挙動の検討, 構造工学論文集, Vol.48A, pp.979-985, 2002.
- 3) 気象庁: 過去の気象データ観測, <https://www.data.jma.go.jp/obd/stats/etrn/index.php>
- 4) 国立天文台: 暦象年表「太陽の角度, 方位角および影の位置の概略値の求め方」, 2005.